

## 高温環境で用いる確率型MEMS センサに関する研究

著者	畠山 庸平
号	57
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4752号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61744">http://hdl.handle.net/10097/61744</a>

氏名	はたけやま ようへい		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成25年3月27日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) ナノメカニクス専攻		
学位論文題目	高温環境で用いる確率型 MEMS センサに関する研究		
指導教員	東北大学准教授 田中 秀治		
論文審査委員	主査	東北大学教授 江刺 正喜	東北大学教授 羽根 一博
		東北大学教授 小野 崇人	東北大学准教授 田中 秀治

## 論文内容要旨

原子力発電所での安全管理、地熱開発における位置把握、またエンジンの高効率化を行う上で、高温環境下でのセンシングは重要である。今までに数多くの耐高温環境向け MEMS (Micro Electro Mechanical Systems: 微小電気機械システム) センサが開発されてきたが、それはセンサ単体での高温耐性を持つものであり、センサの信号を読み取るための回路の耐高温化は、未だに実現できていない。したがって、MEMS センサは高温環境下へ、読み取り用の電子回路を室温環境下に置くこととなる。この計測系の場合、MEMS センサの微小な変化(例: 静電容量変化)を読み取ることが難しくなる。MEMS と読み取り回路をつなぐ配線が長くなり、寄生容量の増加するため測定の SN 比が小さくなってしまうためである。

このような課題に対して、図 1(a)のような確率型 MEMS センサを提案している。振動子が上下対称な電極構造によって駆動され、振動子にパルス電圧を印加することで、上下どちらかにプルインするのだが、プルインする方向は 2 項分布に従う双安定な系となっている。プルインによる大きな静電容量変化の有無を読み取ることは、読み取り回路までの配線の長い SN 比の低い計測系であっても、可能であると考えられる。また、この確率分布は、振動子に加えられる物理量に応じて変化するように設計してある。つまり、図 2 のように振動子の双安定なポテンシャルの形が外力によって変化することを意味する。そのため、パルス電圧を印加した回数の中、片一方にプルインした回数を数えるだけで、確率分布の推定が可能であり、確率分布と物理量との関係が既知であれば、

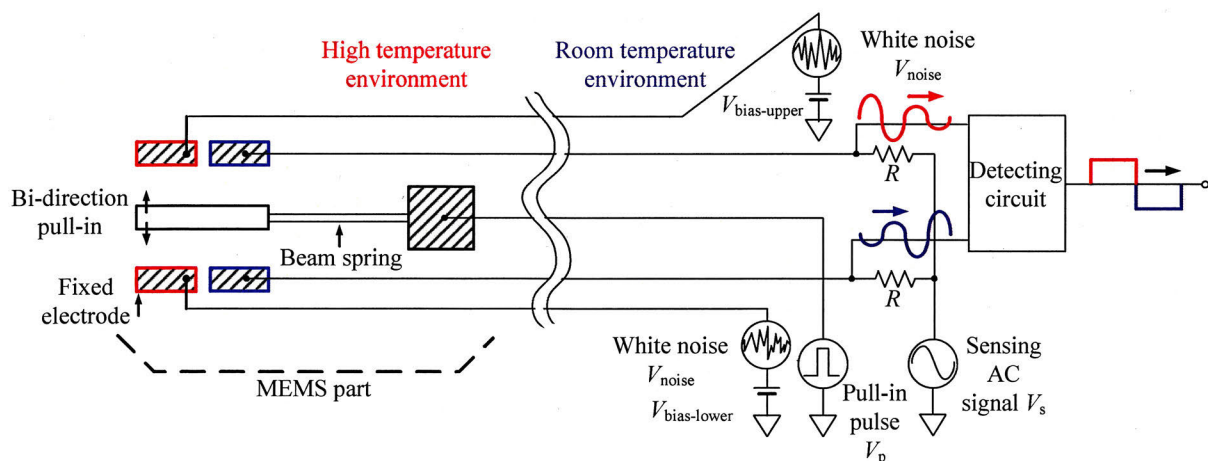


図 1(a). 確率型センサの概念図: 高温環境に置かれた MEMS センサと室温環境に置かれた回路群からなり、プルイン用の駆動回路とプルインを検出する回路がある。

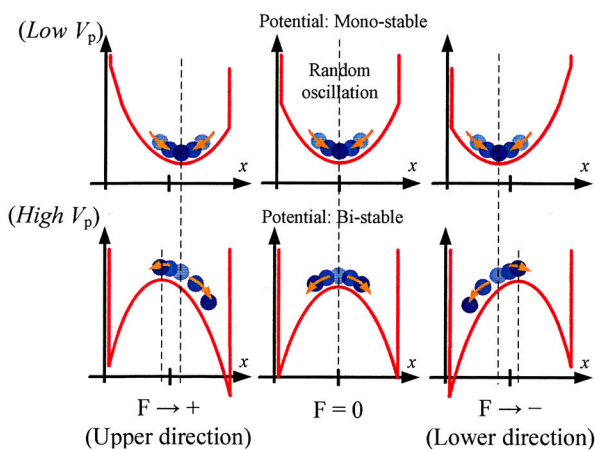
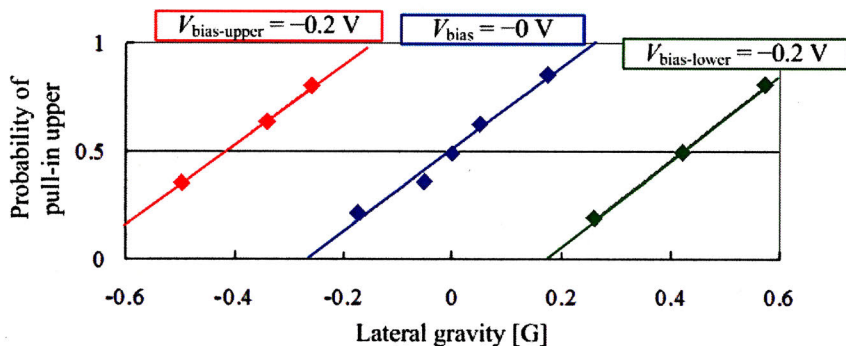
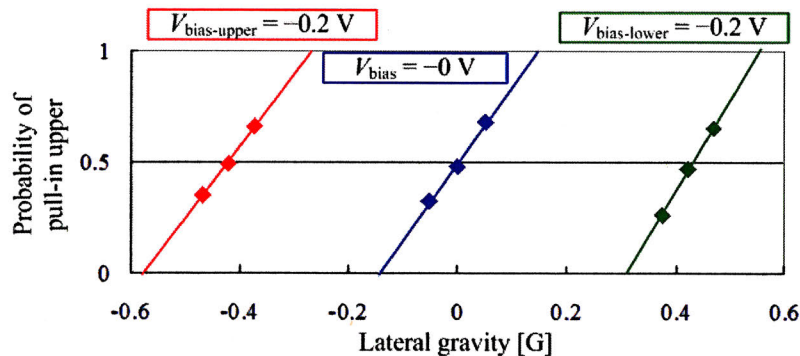


図 2. パルス電圧  $V_p$  の印加や外力の方向による振動子のポテンシャル変化：振動子のポテンシャルは  $V_p$  によって単安定状態から双安定状態に移行する。また外力に依存して双安定状態での位置の確率分布は変化する。



(a)  $V_{\text{noise}} = 2.13 V_{\text{rms}}$  のとき



(b)  $V_{\text{noise}} = 1.25 V_{\text{rms}}$  のとき

図 3. 確率型センサのシミュレーションにおける上にプルインする確率と重力との関係：ノイズ電圧  $V_{\text{noise}}$  によって感度を、上下のバイアス電圧  $V_{\text{bias}}$  によって測定範囲をそれぞれ調整できる。

測定が可能となる。推定における確率分布のパラメータとなる誤差・精度・読み出し回数の3つのパラメータの関係式は、ド・モアブルプラスの定理によって決定される。

この機能を持った MEMS センサの設計・開発を行った。プルイン方向が2項分布に従う双安定な系とプルインを電氣的に2値出力に変換することを実現するために、図1のような、ばねマス系の振動子において、ノイズ電圧によるランダム振動状態と双方向にプルインが可能となる上下対象な静電引力発生機構を設けた。プルインする上下方向が2値化出力に対応するように、交流信号をパルス波に重畳させた。ランダム振動中にプルインさせると、プルイン方向は2項分布に従う系となる。プルインしたマスは、強い静電引力や表面力によってスティッキングが引き起こされる可能

性があるため、非線形ばねを用いてプルインからのリリースの安全率を高めた。本研究では、確率型センサを実証するため、構造体を傾けたときにかかる重力を外力として用い、確率分布との関係を調査した。

設計した MEMS 構造体を電氣的に駆動させたときのマスの挙動をシミュレーションした。プルイン方向は確率的であり、外力によってその確率が変化することが確認された。また、プルインからリリースされた後には、減衰振動過程があるため、この振動が次のプルイン方向に影響しないように十分にその振動が収まってから次のプルイン試行を行う必要があることが明らかとなった。このシミュレーションにおいて、プルイン試行を繰り返し、ある外力がかかった状態において、片一方にプルインする確率（プルイン確率）を算出し、外力とプルイン確率の関係を求めた。これを図3に示す。外力とプルイン確率の関係は 30 ~ 70%の間ではほぼ線形であり、プルイン確率が変化できる 0 ~ 100 %



の範囲が測定範囲となる。線形範囲の傾きを感度と定義すると、ノイズ電圧の振幅値が大きいほど、感度は小さくなることが分かった。また、ノイズ電圧に DC バイアス電圧を加え、駆動電圧を非対称にすることで、感度を保持したまま測定範囲をシフトできることが明らかとなった。ただし、駆動電圧に依存した計測特性の定量的評価は、今後の課題であり、確率微分方程式による解析が必要となる。

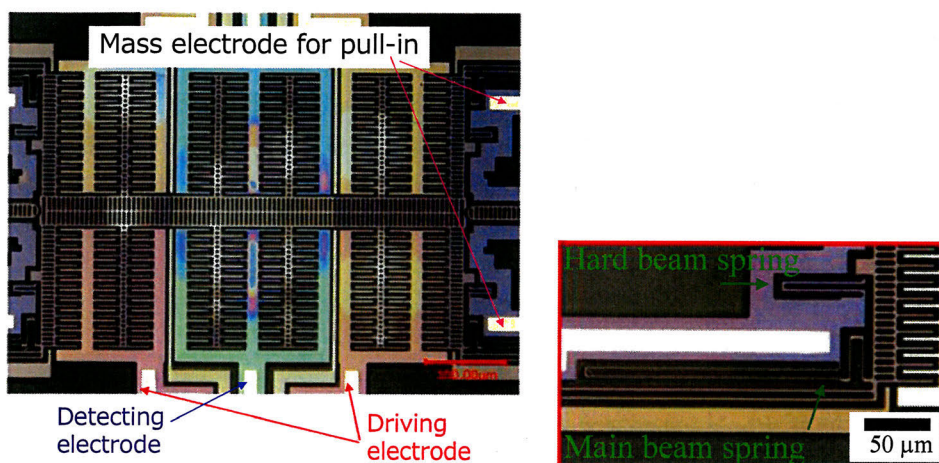
確率型センサの実証のため、Si on Glass ウェハを用いて試作を行った。はじめに、SOI ウェハのデバイス層をガラスウェハに陽極接合する。ハンドリング層、BOX 層を除去した後、デバイス層をセンサ構造体の形にエッチングし、金属薄膜をスパッタで堆積しエッチングによって電極パッドを形成し、ガラスエッチングによって構造体をリリースした。試作した確率型センサの外観を図 4 に示す。Si 表面に色がついているのは、ガラスエッチング時に陽極酸化エッチング効果が働き、Si 表面に微細な凸凹が形成してきた構造色である。

試作したセンサを実装し、機械的特性および確率型センサ特性を評価した。Polytec 社の水平振動測定モード（ストロボ撮影）を用いて、プルインからリリースされた際の減衰振動挙動を測定し、大気中での共振周波数 2.7 kHz

および  $Q$  値 2.4 を得た。

この低い  $Q$  値は表面マイクロマシニングによってガラスウェハ上に形成したデバイス層のフィルムダンピング効果によるものである。低  $Q$  値であることは、減衰時定数（振幅値が  $1/e$  となるまでの時間）が小さく、プルイン試行を高速に繰り返すことができる。今回得られた  $Q$  値を元に、必要減衰時間（ノイズによるランダム振幅値に対して減衰振動が  $10^{-5}$  に収まるまで）を計算し、プルイン周波数 143 Hz を得た。

プルイン方向を電気的に検知し、図 5 のグラフを得た。プルインの際に変化する電圧の変化の SN 比は 5 であり、変化だけを見るには十分である。今回は 1 m の配線を用いたが、今後はさらに長距離化することで、確率型センサの有用性を示せると考える。プルインによる容量変化を検出し



(a) 全体図：4 隅にはマスを支えるばねがある

(b) ばね部の拡大図

図 4. 試作した確率型センサの外観図

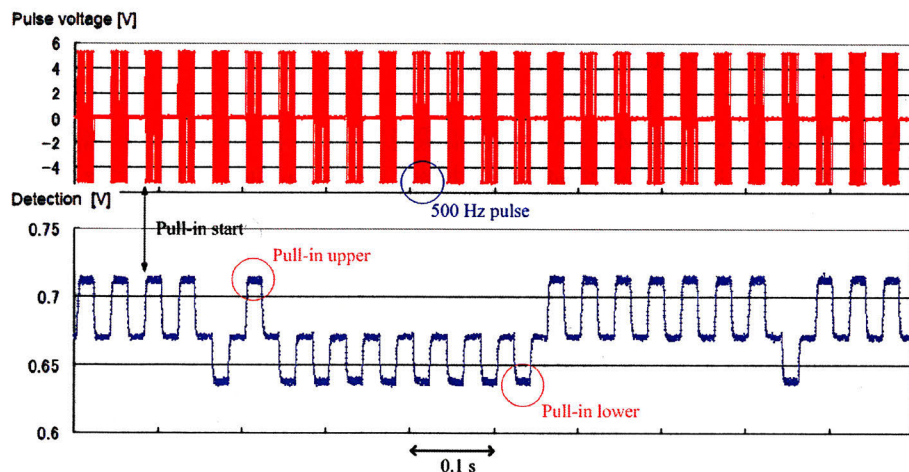


図 5. 確率型センサを駆動したときのパルス電圧  $V_p$  とプルインを検出する電圧の時間変化：パルス電圧のバースト波が発生した際に、上プルインを検出すると電圧が上昇し、下プルインのときは、降下する。プルイン方向が確率的に決定されていることが分かる。

たところ、0.5 pF 変化していた。初期の電極間ギャップ 2.4  $\mu\text{m}$  で形成される静電容量が 0.05 pF であるので、静電容量が電極間距離に反比例することを考慮すれば、プルイン時には初期ギャップの 1/10 の電極間距離となっている。プルイン時のギャップは側面の表面状態に依存するので、デバイス層のエッチング方法を工夫し側面形状を平坦化することで、容量変化の改善が期待できる。

センサを傾けたまま、プルインを繰り返し、外力とプルイン確率との関係を調べた。このときプルイン周波数 2 Hz でこれを 300 回繰り返し、片一方へプルインした回数からプルイン確率を算出した。作製誤差により完全には対称な構造はできなかったため、片一方にバイアス電圧を加え、プルイン方向を確率的にした。駆動結果は、事前のシミュレーション結果とほぼ同様となった。また、パルス電圧の周波数が確率型センサの計測特性に大きな影響を与えることが明らかとなったが、駆動回路を工夫することでその影響をほとんど打ち消すことができることも明らかにした。

設計・試作・評価を行うことで、MEMS 構造体や駆動・検知回路を含めたシステムとしての確率型センサの設計指針を明らかにできた。今後は、定量的に設計ができるように様々な設計パターンについて検証を行うと共に、確率を導入した電気機械システムの運動方程式を解析的に解く必要性がある。

確率型センサを高温環境に適用するために、炭化珪素 (SiC) を用いた MEMS センサの開発を行った。UC Berkeley の Pisano 研究室との共同研究によって、低抵抗率で反らない SiC 薄膜の成膜技術や、微細なパターンを形成できる RIE (Reactive Ion Etching) 技術について開発した。センサの形状は、Si を用いた試作で明らかになった設計指針を元に設計した。確率型センサの作製は、Si ウェハ上に犠牲層となる  $\text{SiO}_2$  を成膜し、開発した SiC を成膜し、更に  $\text{SiO}_2$  を堆積し SiC をエッチング用のマスクとする。SiC をセンサ形状に RIE で加工し、電極パッド用の金属を堆積・パターニングした後、犠牲層を気相 HF によってエッチングし SiC 構造体をリリースする。リリースした構造体はわずかに反っており Si ウェハに接触していたため、 $\text{XeF}_2$  ガスで Si をエッチングして完全にリリースした。

試作したセンサを駆動したところ、プルインの際にスティッキングが生じ、プルイン試行を繰り返すことができなかった。これは、リリース用ばねのポテンシャルがスティッキング時の表面力のそれを超えられなかったためである。構造体のスティッキング面を観察したところ、RIE による加工を行った面は、前節の試作したセンサの側面 (ボッシュプロセス) と比べ滑らかであり、表面力に応じたリリース用ばねの設計が不可欠であることが明らかとなった。

SiC を用いた確率型センサの正常動作は確認できなかったが、SiC 薄膜の堆積・加工技術は、既にセンサを作製できる水準に達しているといえる。僅かな反りに関しては、センサ面積を狭めるなどして設計によって解決できる範囲にあるので、今後改善できるものと考えられる。

高温環境下で用いることができる計測システム (MEMS センサは高温環境に置き、読み出し用の回路は室温環境に置き、それらを長い配線でつないだ系) として、確率型 MEMS を提案した。Si on Glass を用いてセンサを設計・試作し、その計測特性はシミュレーションとほぼ一致し、確率型センサを実証した。高温環境でも用いるためには、SiC を用いての製作が必要なため、その製作技術の開発を行った。試作したセンサは、プルイン後のリリース動作ができなかったため、表面張力を考慮した設計が必要であることが明らかとなった。本研究で得られた知見は、高温環境下での計測技術において重要なマイルストーンになると考えられる。

# 論文審査結果の要旨

熱機関やプラントの制御，地下資源開発などのために，高温環境での各種センシングのニーズがある。MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術によるセンサは，小形，高感度，あるいは高信頼であることから様々なシステムに用いられているが，高温環境での使用は進んでいない。MEMS 技術によるセンサを高温環境で用いるためには，センサ自体の耐熱性に加えて，センシング信号の読み出し方法が課題である。センシング信号の増幅，処理などは，集積回路を含む電気回路を用いて行われるが，シリコンのトランジスタやダイオードは高温では動作しないので，高温環境から離れた場所に設置しなくてはならない。しかし，センサと読み出し回路とを長い配線で接続すると，ノイズの侵入や寄生要素の増加のために信号／雑音比や感度が低下し，特にセンサが小形の場合，有意なセンシングが困難になる。

本論文は，上述の課題に対して，機械的な双安定状態の確率的な挙動を用いた新しいセンシング方式の提案，そのシミュレーション，確率型センサの試作と評価，耐熱材料である炭化珪素（SiC）を用いたセンサ作製技術の開発などを行った成果をまとめたものであり，全編 5 章からなる。

第 1 章は序論であり，研究の背景として高温センシングのニーズや技術的課題が論じられた後，研究の目的が述べられている。

第 2 章では，本研究で新たに提案された確率型センシングの原理，およびシミュレーションによるセンサの設計が述べられている。2 方向に動く対称な静電アクチュエータを白色雑音によってランダム振動させておき，そこに十分高い駆動電圧を加えると，アクチュエータがどちらの方向にもプルインしうる双安定状態が形成される。外乱がなければ，両方向に等しい確率でプルインするが，たとえば，加速度が加われば，その確率に変化が生じ，それから加えた加速度を知ることができる。このような原理の確率型センサが動作することを，物理モデルに基づく詳細なシミュレーションで確認し，それに基づいてセンサの具体的設計を行ったことは，重要かつ有用な成果である。

第 3 章では，設計したセンサを半導体微細加工技術によって作製し，評価した結果が述べられている。ガラス基板上に単結晶シリコン層を用いてセンサが成功裏に作製され，その基本的機械特性や確率的動作が確認されている。また，センサを傾斜させて静的加速度を加え，それを一方にプルインする確率から定量的に測定できることが実証されている。さらに，静電アクチュエータの固定電極に与えるバイアス電圧とノイズを変化させた場合のセンサの挙動が調べられ，実験結果がシミュレーション結果と比較して議論されている。これらの成果は，確率型センサの動作を実証し，その特性を明らかにした点で，有用かつ重要である。

第 4 章では，耐熱材料である SiC を用いて確率型センサを作製する技術が述べられている。犠牲層となる酸化シリコン（SiO<sub>2</sub>）を成膜したシリコン基板上に，多結晶 SiC を CVD（Chemical Vapor Deposition）によって成膜し，これを RIE（Reactive Ion Etching）によってパターニングし，最後に SiO<sub>2</sub> の犠牲層エッチングを行って，SiC 製確率型センサが試作されている。センサ構造がおおむね良好に作製でき，SiC 製確率センサの基本作製技術が確立されている。これは，本センサに限らず，広く耐熱性または耐食性センサに適用できるものであり，有用な成果である。

第 5 章は結論である。

以上，本論文は，高温環境で用いる MEMS センサのために新しい確率型センシングの原理を提案し，その有用性をシミュレーションと原理実証デバイスの試作・評価によって明らかにし，さらに，耐熱性材料である SiC を用いて MEMS センサを作製する基本技術を確立した成果をまとめたものであり，ナノメカニクスとマイクロマシン工学に寄与するところが少なくない。よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。